

計測融合型加工システムによる機上計測*

小池雄介** 河野大輔*** 松原 厚*** 山路伊和夫***

In-situ Measurement by Using a Measurement-Fused Machining System

Yusuke KOIKE, Daisuke KONO, Atsushi MATSUBARA and Iwao YAMAJI

A calibration method is proposed to compensate the measurement error in in-situ measurement using non-contact probes. In the measurement with a measurement-fused machining system, a displacement for calibration is measured with the probes for reference and profile measurement to calibrate the profile probe according to the reference probe. In this paper, the proposed method is used to compensate the measurement error of a triangular surveying type laser displacement sensor caused by tilting of the measuring surface. The experimental result shows that the error is decreased from $\pm 0.9 \mu\text{m}$ to $\pm 0.5 \mu\text{m}$ with the method.

Key words: tool motion, workpiece profile, in-situ measurement, measurement-fused machining system, triangular surveying type laser displacement sensor

1. 緒 言

マイクロ切削工具による加工は 3 次元自由形状の加工が可能であるため、様々な分野での微細形状加工に応用されている。切削加工においては、工作機械の運動により発生する誤差（母性原則による誤差）および加工現象に起因する誤差を抑制することが重要である。しかし、これらを分離して制御することはたいへん難しい。したがって従来は加工後の形状をオフラインで測定して目標形状からの誤差を同定し、この誤差をキャンセルするための補正値を加工機に与えて形状修正を行う方法が用いられてきた。この方法は修正加工とよばれており、位置決め再現性が高い加工機を用いて行われている。しかし、工作物を取り外して形状測定機で測定を行い、再び元の状態に取り付けて加工を続けることは難しい。そこで、工作物の形状を機上計測するという方法が用いられるようになった。機上計測を用いた修正加工に関する研究の例として、垣野ら¹⁾や武沢ら²⁾によってなされたものがある。

機上計測には干渉計や走査型プローブが用いられるが^{3)~5)}、走査型プローブは機械のヘッドに装着しやすいので応用範囲が広い。走査型プローブには、接触式と非接触式がある。非接触式は、加工面を傷つけず、計測の高速化ができるという点で有望であり、レーザプローブを用いる方法が一般的である。機上計測に用いるレーザプローブは三角測量型と同軸計測型の 2 種類に分類できる。同軸計測型を採用した機上計測として、理化学研究所にて開発されたレーザプローブユニットがある⁶⁾。一方、三角測量型を採用した例は、浦ら⁷⁾や中川ら⁸⁾による研究がある。

レーザプローブを用いて加工面形状を機上計測した場合、加工機の運動誤差と工作物の形状を分離する操作が必要である⁹⁾。また、センサの非線形性、測定面の表面性状、傾き、色、工作物材質による測定誤差が生じる。三角測量型による形状計測は測定面の表面性状の影響を受けやすいが、同軸計測型は影響を受けにくいとされている。拡散反射方式の三角測量型レーザ変位センサに生じる測定誤差に関しては金田による研究がある¹⁰⁾。

同軸計測型においても、そのスポット径と加工面のあらさの関係で測定誤差が生じる。様々な加工面に対応するためには、これらの測定誤差をその場で校正または補正する必要がある。

機上計測において機械の運動誤差と工作物の形状を分離する方法として、測定中の機械の運動を測定し、測定値から機械の運動誤差を取り除く方法が提案・実用化されている¹¹⁾¹²⁾。これらの方法では機械に設置したアーティファクトを用いてプローブの運動計測を行っている。しかしながら、加工面の表面性状などの影響により、工作物形状の計測が正しく行われない場合は運動誤差を取り除く操作が別の測定誤差を発生してしまう。

本研究では、アーティファクトを用いて運動計測を行う機上計測において、加工面の表面性状などの影響によってセンサに生じる測定誤差を補正する方法を提案する。具体的には参照用と加工面測定用の 2 つのレーザ変位センサを用いた機上計測の結果を比較して、測定面の傾きによる測定誤差を補正する。また、この校正法を機上計測に適用した場合の効果を検証する。検証には前報¹³⁾で報告した計測融合型加工システムを用いる。

2. 測定面の傾きと表面粗さによる測定誤差

検証に用いるシステムでは後述するように 2 つの正反射方式の三角測量型レーザ変位センサを用いる。レーザ変位センサは測定面の傾きや表面粗さの影響を受けることが知られている。

正反射方式の三角測量型レーザ変位センサを用いると、測定面の傾きによって図 1 に示すように測定誤差が生じる。まず測定面がレーザ変位センサの光軸に対して垂直である場合を傾き 0 度とする。三角測量型レーザ変位センサは測定対象物の変位を反射光の受光素子上での変位に変換して測定するため、同じ変位を測定していても測定面が傾いていた場合、実際の変位が拡大または縮小して測定される。本論文では、この倍率を測定倍率とよぶ。測定倍率は、反射光に対するレーザ変位センサ内の受光素子の傾き、測定面の傾き、測定面に対するレーザ光の入射光と反射光のなす角度の 3 つの値によって幾何学的に定まる。

そこで三角測量型レーザ変位センサにおいて、測定面の傾きによって生じる測定誤差を調べる。実験では 3 軸加工機のテーブル上に X 軸周り、もしくは Y 軸周りに傾けたオプティカルフラットを設置して Z 軸に設置したレーザ変位センサの測定ターゲット

* 原稿受付 平成 21 年 10 月 2 日

** 学生会員 京都大学大学院（京都府京都市左京区吉田本町）

*** 正 会 員 京都大学大学院

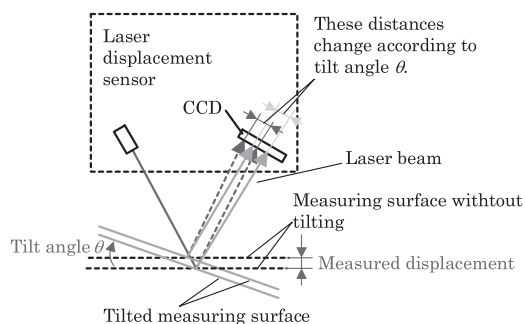


Fig.1 Measurement error occurred by tilted measuring surface

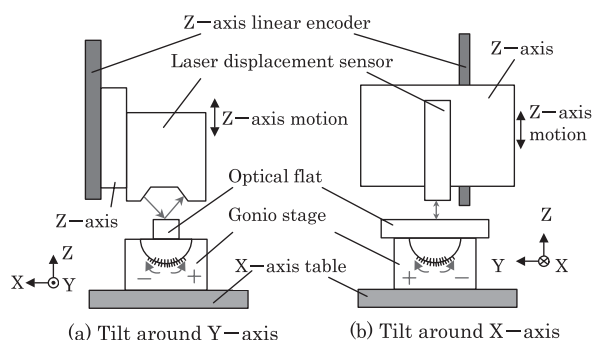


Fig.2 Schematic view of experimental setup

ットとする。そして、様々な傾斜角度において Z 軸を往復運動させた場合の Z 軸の変位を変位センサとリニアエンコーダで測定して比較する。仕様ではオプティカルフラットの表面精度は PV 値で $\lambda/15$ 以内、 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ である。このオプティカルフラットを測定面とすることで、測定面の表面性状、色、材質によって生じる測定誤差を小さくし、測定面の傾きによる測定誤差のみを測定することができる。

図 2 に実験装置の概要を示す。本実験では、ゴニオステージを用いてオプティカルフラットを X, Y 軸周りに傾ける。往復運動の振幅は $30 \mu\text{m}$ とした。測定回数はオプティカルフラット上で測定位置を 3 回変更し、各点で 3 回測定を行ったため、各傾きにおいて 9 回である。表 1 に実験に使用したレーザ変位センサの仕様を示す。

測定誤差の評価のために、縦軸をレーザ変位センサの測定結果、横軸をリニアエンコーダの測定結果としてプロットし、最小二乗法を用いて近似直線の傾きを計算した。レーザ変位センサとリニアエンコーダの測定結果が一致する場合、近似直線の傾きは 1 となる。よって、この近似直線の傾きが測定倍率に相当する。近似直線に対するレーザ変位センサの測定結果の標準偏差は 36 nm であり、測定系のノイズと同程度であった。

図 3 に各測定面の傾きに対する測定倍率の平均値を示す。同じ傾きの測定面における測定倍率の標準偏差は 1.6×10^{-3} であったため、測定位置の変更による影響は無視できる。レーザの反射光が受光素子で検出できるのは、X 軸周りの傾きでは -8 度から +8 度の範囲、Y 軸周りの傾きが -5 度から +4 度の範囲であった。X 軸周りの傾きではどの傾きに対しても測定倍率はほぼ 1 であるが、Y 軸周りでは傾きにほぼ比例して測定倍率が変化している。この測定倍率の変化は三角測量型レーザ変位センサの測定原理によるものである。Y 軸周りの角度における測定倍率の傾向が +4 度において変化するの、レーザの反射光が受光素子で検出できなくなる直前であることが原因だと考えられる。よって、Y 軸周りの傾きが -5 度から +4 度の

Table1 Major specifications of triangular surveying type laser displacement sensor used in the experiment

Setting mode	Specular reflection
Reference distance	8 mm
Measurement range	$\pm 1 \text{ mm}$
Spot diameter at reference distance	$20 \mu\text{m}$ (True circle)
Resolution	10 nm
Angle between incident light and reflected light	90°

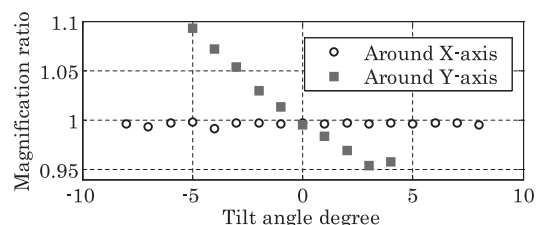


Fig.3 Relationship between mean value of magnification ratio and tilt angle of the measuring surface

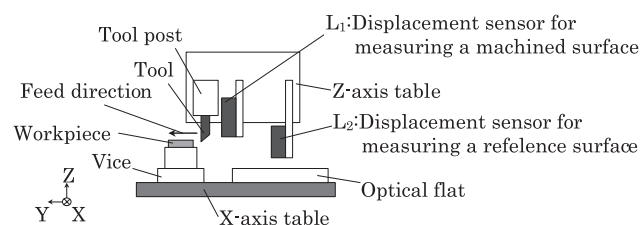


Fig.4 Schematic view of in-situ measuring system

範囲ではレーザ変位センサでの測定結果は実際の変位の約 1.10~0.95 倍となることがわかった。

また、変位測定に対する測定面の表面粗さの影響を調べるために、同様の実験を測定面をブロックゲージの表面に変更して行った。このブロックゲージはクロム鋼製で等級 1 である。また、測定面の表面粗さを触針式表面粗さ測定機で測定したところ、算術平均粗さ $Ra0.006 \mu\text{m}$ であった。レーザ変位センサでの測定の結果、測定倍率が傾きに依存するとしたときのばらつきの標準偏差は 50.1×10^{-3} となり、オプティカルフラットを測定した場合と比較して大きくなった。ただし、測定位置が同じ場合、測定の繰り返しのみの測定倍率のばらつきの標準偏差は 4.9×10^{-3} であった。ブロックゲージの測定で、測定倍率が測定位置の影響を受ける原因は、測定面の表面粗さによって受光素子上のレーザの強度むらに変化するためであると考えられる。

よって、表面粗さによる測定誤差が小さい条件において測定倍率を求めることができれば、その値で測定結果を除することで測定面の傾きによる測定誤差を取り除くことができる

3. 同時校正測定法による測定誤差の低減

3.1 机上計測システム

加工面形状の測定結果から測定時に含まれる機械の走査運動による誤差と測定倍率による測定誤差を取り除くための机上計測システムについて述べる。

まずシステムの構成を図 4 に示す。机上計測システムは 2 つの三角測量型レーザ変位センサ L_1 , L_2 を備えている。 L_1 は Z 軸上の工具の近くに配置され、工具と加工面の相対変位を測定するセンサである。 L_1 を加工面測定センサとよぶ。 L_2 はテーブル

上に設置したオプティカルフラットと Z 軸との相対変位を測定するセンサである。つまり、加工面測定のための走査運動に伴う Z 方向の変位を測定する。L₂を参照面測定センサとよぶ。

3.2 従来の機上計測の問題点

加工面形状を $p(y)$ 、測定運動時の Z 方向の運動誤差を $e_z(y)$ 、L₁ が検出する変位を $L_1(y)$ 、L₂ が検出する変位を $L_2(y)$ とすると次式が成り立つ。

$$L_1(y) = S_1 \{p(y) + e_z(y)\} \quad (1)$$

$$L_2(y) = e_z(y) \quad (2)$$

ただし、 S_1 は測定範囲内での L₁ の平均感度である。また L₂ は別の校正用センサで校正され、平均感度が 1 であると仮定している。平均感度とは、センサの測定範囲内における、実変位とセンサの出力変位の関係を最小二乗近似した直線の傾きをあらわす。従来、 $p(y)$ を求めるためには、 $L_1(y)$ と $L_2(y)$ の差をとるとする方法がとられ、

$$L_1(y) - L_2(y) = S_1 \cdot p(y) + (S_1 - 1) \cdot e_z(y) \quad (3)$$

となる。したがって、 $S_1 = 1$ でない場合は測定誤差が生じる。例えば、第 2 章で述べた測定倍率が生じると $S_1 = 1$ とならない。この問題を解決するために加工面の変位に沿って Z 軸を運動させる方法がある。Z 軸の運動を $z(y)$ とすると、

$$L_1(y) = S_1 \{p(y) + e_z(y) + z(y)\} \quad (4)$$

となる。 $L_1(y)$ が常に一定値、例えば 0 になるように Z 軸を運動させると、

$$L_1(y) = S_1 \{p(y) + e_z(y) + z(y)\} = 0 \quad (5)$$

となるため、参照面測定センサ L₂ の測定する変位では

$$L_2(y) = e_z(y) + z(y) = -p(y) \quad (6)$$

が成り立ち、 $p(y)$ を求めることができる。この測定方法は零位法であるが、この方法では、 $L_1(y) = 0$ とするためのフィードバック機構が必要となる。また、零位に合わせる動作に時間がかかるため、サンプリングのたびに走査運動を停止させなければならず、測定時間が長くなってしまう。

3.3 同時校正測定法

測定中の Z 軸に校正用の運動を含む測定運動を与えることで、平均感度を校正しながら加工形状を高速に測定する同時校正測定法を提案する。以下に測定手順を示す。

STEP 1：予備測定

まず、Z 軸の測定運動なしで X 軸の走査運動を行い、加工面形状を L₁ で測定する。測定値 $L_1(y)$ には、式(1)で示す加工面形状、走査運動にともなう運動誤差に加えて、加工機の振動や測定ノイズが含まれる。同様に測定値 $L_2(y)$ にも、式(2)で示す走査運動にともなう運動誤差に加えて、加工機の振動や測定ノイズが含まれる。そこで、測定運動を決定するために $L_1(y)$ をフーリエ変換し、波長分析を行う。この段階ではセンサの平均感度 S_1 はセンサの公称値、もしくは以前に校正したときに得られた校正値を用いる。

STEP 2：測定運動の決定

上記 STEP1 で得たデータを用いて Z 軸の測定運動 $z_c(y)$ を決定する。測定運動を次式に示す。

$$z_c(y) = z_s(y) + z_p(y) \quad (7)$$

ただし、 $z_s(y)$ は平均感度を校正するための運動、 $z_p(y)$ は後述する調整関数である。 $z_s(y)$ は次式で示す正弦波関数とする。

$$z_s(y) = A \cdot \sin\{2\pi(y - y_0)/\lambda_c\} \quad (8)$$

ただし、 A は正弦波運動の片振幅、 y_0 は初期位相である。波長 λ_c は $L_1(y)$ が含む波長成分と重ならないように決定する。この理由は後述するように、波長をもとに平均感度を求めるためである。平均感度校正のための運動 $z_s(y)$ として正弦波を選択した理由は、機上計測と同時に校正を行い、機上計測の結果と校正に必要な測定結果を波長分析によって分離するためである。また、次の条件を満たすように A と y_0 を調整する。

$$\max\{L_1(y) + z_c(y)\} = d_{\max} \quad (9)$$

$$\min\{L_1(y) + z_c(y)\} = d_{\min} \quad (10)$$

ただし、 $[d_{\min}, d_{\max}]$ はセンサ L₁ の線形誤差が大きくなるように選ばれた測定範囲である。この測定範囲が大きすぎると線形誤差の影響が大きくなり、測定誤差が生じてしまう。 $z_p(y)$ はこの条件を満たす正弦波が得られないときに設定する関数であり、 λ_c を含まないように設定する。

STEP 3：本測定

上記で決定した測定運動 $z_c(y)$ を Z 軸に与えながら L₁、L₂ で加工面形状と参照面を測定すると次式が成り立つ。

$$L'_1(y) = S_1 \{p(y) + e_z(y) + z_c(y)\} \quad (11)$$

$$L'_2(y) = e_z(y) + z_c(y) \quad (12)$$

ただし、測定運動を与えながら機上計測を行ったときに、L₁ が検出する変位を $L'_1(y)$ 、L₂ が検出する変位を $L'_2(y)$ とする。得られた $L'_1(y)$ 、 $L'_2(y)$ の各々から λ_c の波長成分を分離して、その振幅比を求めて平均感度 S_1 を決定する。振幅比を求めるには様々な方法があるが、例えば $L'_1(y)$ 、 $L'_2(y)$ をフーリエ変換して λ_c でのパワースペクトルの比を計算して求める方法がある。

STEP 4：加工面形状の計算

次式を用いて、求めた平均感度 S_1 で $L'_1(y)$ を校正して加工面形状 $p(y)$ を計算する。

$$p(y) = L'_1(y)/S_1 - L'_2(y) \quad (13)$$

以上の手順で同時校正測定法を実施することによって、加工面測定センサの平均感度を校正しながら加工面形状を測定することができる。

4. ケーススタディ

3.3 節で述べた同時校正測定法を実際の機上計測に適用する。測定対象の加工と機上計測の条件を表 2 に示す。測定する加工面形状は、全振幅 2 μm で波長が 1.5 mm から 0.5 mm に線形かつ連続的に変化するサインスイープ形状とし、計測融合型加工システムを用いて Y 方向に加工を行った。図 5 に光学顕微鏡で撮影した単結晶ダイヤモンド工具の刃先と加工面の外観を示す。40 ライン加工したため、加工面の幅は 2 mm となっている。レーザ変位センサ L₁ に

は第 2 章で使用したレーザ変位センサを用いた。レーザ変位センサ L_2 の仕様は、ほぼ表 1 と同じであるが、測定基準距離：10 mm，入射光と反射光のなす角度：75 度の 2 点が異なる。レーザ変位センサ L_2 は測定面がオプティカルフラットであり、測定面の傾きや表面粗さなどの影響を受けないため、平均感度が 1 であると仮定する。

図 6 に加工面形状とレーザ変位センサ L_1 の関係を示す。加工面には切削工具のノーズ半径が転写されており、レーザ変位センサとの位置関係によって測定点に Y 軸周りの傾斜が生じる。この傾斜が原因で発生する測定倍率を、同時校正測定法を用いて校正する。サインスイープ形状によって、X 軸周りの傾斜も生じるが、第 2 章で述べたように X 軸周りの傾斜の影響は小さいため無視できる。

図 7 に STEP 1 より Z 軸の測定運動を指令することなく L_1 で測定した加工面形状 $L_1(y)$ と、 L_2 で測定した運動誤差 $L_2(y)$ を示す。3 ライン分の測定結果を重ねて表示している。同図において、参照面測定用センサの測定結果に生じているスパイク状の突起は同一ラインで測定が再現するので、オプティカルフラット上のほこりや傷によるものである。加工面測定用センサの生じているスパイク状の突起は、加

工面上の傷切り屑の影響と考えられるが、これは明らかではない。また、同図の $L_2(y)$ より、波長 10mm の運動誤差が生じていることがわかる。これは Y 軸のボールねじの振れ回りによるものである。この運動誤差は $L_1(y)$ にも含まれている。

図 8 に STEP 1 で得た $L_1(y)$ のパワースペクトルを示す。加工面形状が波長 1.5 mm から 0.5 mm に連続的に変化するサインスイープ形状であること、ボールねじ振れ回りによる波長 10 mm の運動誤差があることから、今回の測定では STEP 2 で決定する校正運動 $z_s(y)$ の波長 $\lambda_c = 2$ mm，全振幅 $2A = 2 \mu\text{m}$ とする。今回は調整関数 $z_p(y)$ は使用しない。

図 9 に STEP 3 より測定運動を指令して測定した $L'_1(y)$ ， $L'_2(y)$ を示す。同図より、 $L'_2(y)$ には波長 10 mm のボールねじの振れ回りと波長 2 mm の測定運動が含まれていることがわかる。今回の測定では感度 S_1 の決定にパワースペクトルを用いる。図 10 に校正運動を指令して測定した $L'_1(y)$ ， $L'_2(y)$ のパワースペクトルを示す。波長 2 mm におけるピークの値から計算すると平均感度 $S_1 = 1.39$ となる。この平均感度の値は図 3 における測定倍率の最大値 1.10 よりも大きい。この原因として、レーザ変位センサのスポット径 $20 \mu\text{m}$

Table 2 Experimental conditions

Cutting tool	Material	Single Crystal Diamond
	Nose radius	0.2 mm
	Rake angle	0°
	Relief angle	7°
Workpiece		Electroless Plated Nickel
Feed rate		3000 mm/min
Pick feed		50 μm
Machined profile	Total amplitude	2 μm
	Wavelength	1.5 mm ~ 0.5 mm
Sinusoidal profile for calibration	Total amplitude $2A$	2 μm
	Wavelength λ_c	2 mm
Sampling frequency		5 kHz

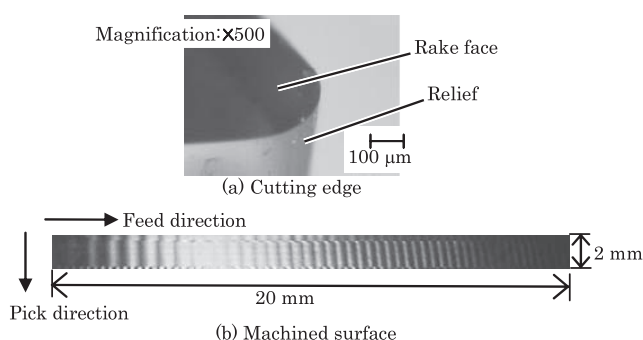


Fig. 5 Cutting edge and machined surface

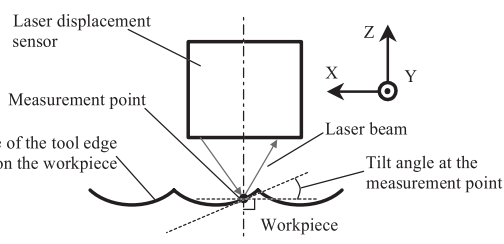


Fig. 6 Schematic view of laser displacement sensor and machined surface

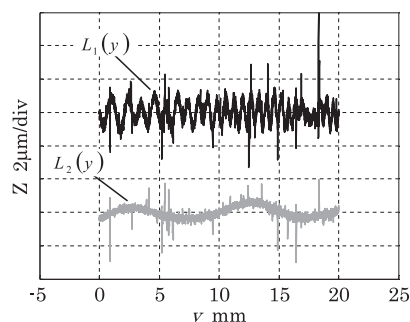


Fig. 7 Measurement results without calibrating motion

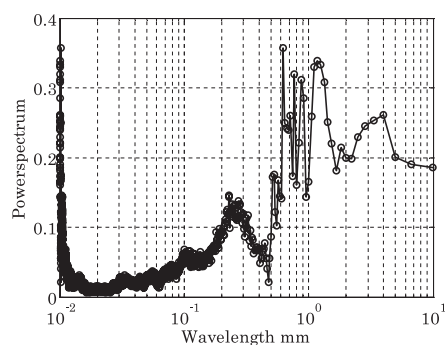


Fig. 8 Power spectrum of $L_1(y)$ before calibration

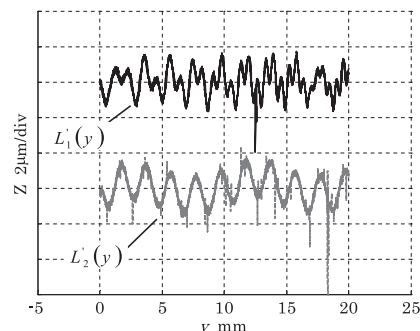


Fig. 9 Measurement results with calibrating motion

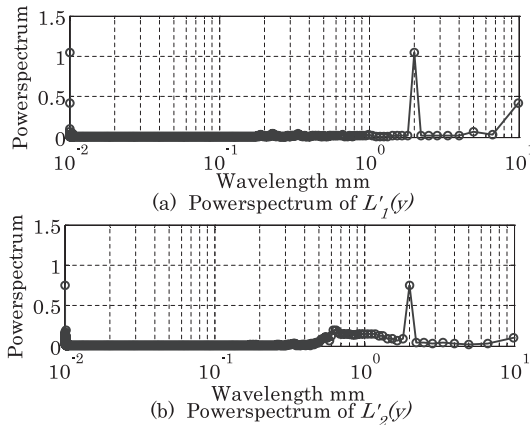


Fig.10 Powerspectra of $L'_1(y)$ and $L'_2(y)$ with calibrating motion

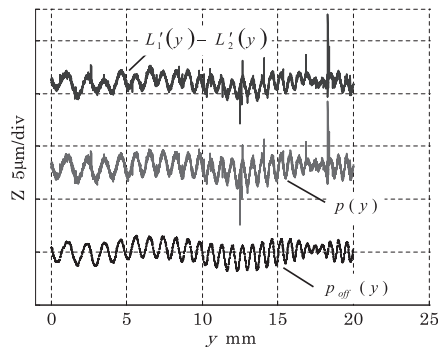


Fig.11 Comparison of measurement results before and after calibration

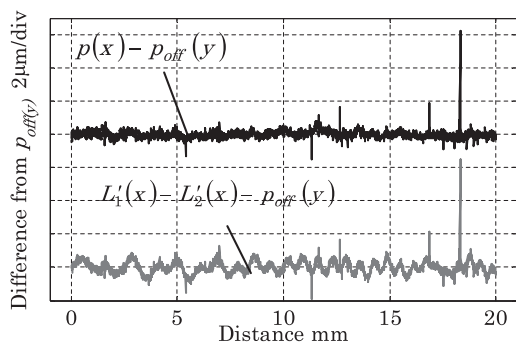


Fig.12 Comparison of measurement error before and after calibration

の範囲内でも測定面の形状が変化していることや、ピックの間にあるカスプの部分測定していることが考えられる。

図 11 に STEP4 より、求めた平均感度 S_1 で $L'_1(y)$ を校正して求めた加工形状 $p(y)$ 、 $L'_1(y)$ の校正を行わずに求めた加工面形状 $L'_1(y) - L'_2(y)$ 、比較のために触針式表面粗さ測定機を用いてオフラインで測定した加工面形状 $p_{off}(y)$ を示す。また、図 12 に S_1 を用いて校正した場合と校正しなかった場合で、触針式表面粗さ測定機の測定に対する机上計測の差を計算した結果を示す。図 12 において、測定距離 17 mm 付近で加工面形状の振幅が小さくなっているのは、加工機の固有振動が 80 Hz にあることが原因である。図 12 より S_1 による校正を用いない場合、 $\pm 0.9 \mu\text{m}$ 程度の差が生じている。これと比較して校正を用いた場合では差が小さくなっていることがわかる。これは、加工面形状に対応した測定面の傾きによる誤差が減少したためである。しかしながら、

校正を用いた場合でも波長が短い成分のために $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 程度の差がある。これはレーザ変位センサと測定対象が静止していても生じる測定系のノイズであると考えられる。よって、これらを除けば、平均感度 S_1 を用いて校正を行った机上計測の結果は触針式表面粗さ測定機での測定結果とほぼ一致している。

5. 結 言

参照用と加工面測定用の 2 つの変位センサをもつ計測融合加工システムにおいて、加工面の表面性状などの影響によってセンサに生じる測定誤差を補正する方法を提案した。また、本方法を机上計測に適用した場合の効果を実験により検証した。本論文で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 測定面の傾きによって正反射方式の三角測量型レーザ変位センサに生じる測定誤差を調べた。実験に使用したレーザ変位センサでは、測定面の傾きが -5 度から $+4$ 度の範囲において、変位が約 1.10 から約 0.95 倍の大きさとして測定される。
- (2) 測定中に変位センサの平均感度を校正する同時校正測定法を提案した。本方法では、平均感度を求めるための運動を与えながら机上計測を行うことで、加工機の運動誤差による測定誤差と加工面測定用の変位センサの平均感度が 1 とならない場合の測定誤差を取り除いた加工面形状を求めることができる。
- (3) 提案した同時校正測定法によって測定面の傾きによる測定誤差を補正し、触針式表面粗さ測定機での測定結果に対する机上計測の差が $\pm 0.9 \mu\text{m}$ から $\pm 0.5 \mu\text{m}$ になった。

参 考 文 献

- 1) 垣野義昭, 井原之敏, 岩崎嘉徳, 松原 厚, 大坪 寿: 除去加工用修正加工システムに関する研究 (第 1 報) — 2 次元輪郭形状の修正研削加工 —, 精密工学会誌, **59**, 10(1993)107.
- 2) 武沢英樹, 古谷克司, 毛利尚武: 形状フィードバック型精密加工システムの開発 (第 1 報) — 基本概念と修正加工例 —, 精密工学会誌, **65**, 3(1999)406.
- 3) 野村 俊: 加工機上における大鏡面の干渉測定技術, 精密工学会誌, **58**, 5(1992)75.
- 4) 鈴木 弘, 新野康生, 遠山退三, 平野 稔, 難波義治: オンマシナ計測による斜入射 X 線ミラーの超精密研削, 精密工学会誌, **61**, 9 (1995) 1285.
- 5) 垣野義昭, 岩田義雄, 岩崎嘉徳, 大坪寿: 加工形状誤差の偏差検出型オンマシナ計測に関する研究, 精密工学会誌, **58**, 6(1992)1059.
- 6) 森田晋也, 渡邊 裕, 大森 整, 林 偉民, 上原嘉宏: レーザプローブによる非接触オンマシナ形状測定, 砥粒加工学会, **50**, 11(2006)645.
- 7) 浦 治男, 谷口朝信, 長江 謹: 曲面形状の非接触式による机上測定技術, 機械と工具, **51**, 12 (2007) 29.
- 8) 中川平三郎, 廣垣俊樹, 梶 章宏, 喜田義宏, 垣野義昭: 自由曲面のポイント計測に適したレーザスタイラスの机上走査制御, 精密工学会誌, **69**, (2003) 1423.
- 9) 高 偉: 形状誤差と運動誤差の分離による回転精度のナノ計測, 精密工学会誌, **67**, 7 (2001) 1067.
- 10) 金田 一: 三角測量法によるレーザ式変位計の高精度化, 計測自動制御論文集, **27**, 8(1991)853.
- 11) J.B.Bryan and D.L.Carter: Design of a new error-corrected co-ordinate measuring machine, Precision Engineering, **1**, 3(1979)125.
- 12) 古住恵一, 久保圭司, 竹内博之, 半田宏治, 葛西孝昭: ナノメートルを測る原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機, 精密工学会誌, **68**, 3 (2002) 361.
- 13) 河野大輔, 松原 厚, 小池雄介, 山路伊和夫: 計測融合型加工システムによる工具刃先運動の転写率の測定, 精密工学会誌, **75**, 4(2009)520.